

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПЕРСПЕКТИВНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА ЗІ ЗМІННИМИ КУЗОВАМИ

Інститут технічної механіки

*Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лейко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail: sobmb@i.ua*

Актуальність даної роботи полягає в необхідності використання в Україні нових ефективних технологій вантажних перевезень, оновлення парку вантажного рухомого складу, поповнення його вагонами зі змінними кузовами та підвищення безпеки їх експлуатації. Вагони зі змінними кузовами є інновацією у сфері транспортних послуг. Традиційно універсальні та спеціалізовані залізничні вагони складаються з екіпажної частини (ходові частини, автозчипні та автогальмівні пристрої), яка як правило, є універсальною, та кузовної частини (рама з кузовом), що визначає спеціалізацію вагона під конкретний вид вантажу. При цьому вартість екіпажної та кузовної частин становить відповідно 80 % і 20 % від вартості всього вагона. Ідея розробки вагонів із змінними кузовами полягає у відокремленні рами від кузова вагона та віднесення її до екіпажної частини, в той час як до кузовної частини вагона буде належати тільки кузов. Таким чином, екіпажною частиною такого вагона є платформа для перевезення змінних кузовів, що складається з рами, ходових частин, автозчипного, автогальмівного обладнання та пристроїв кріплення змінних кузовів. Новий вид вантажного рухомого складу для унімодальних залізничних перевезень – вагон зі змінними кузовами, які при сезонних змінах вантажів можуть замінюватись у порожньому стані. Для вітчизняних залізниць доцільно розробити свою конструкцію вантажного вагона зі змінними кузовами. Створення сучасних вантажних вагонів зі змінними кузовами потребує науково-технічного супроводження на етапах їх проєктування та експериментального відпрацювання. Метою досліджень, викладених в статті, є визначення максимальних навантажень на несучі елементи конструкцій вагонів зі змінними кузовами при нормативних режимах руху та розробка пропозицій щодо перспективної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами. Наукову новизну має розроблена математична модель просторових коливань вантажного вагона зі змінними кузовами при нормативних режимах руху по колії довільного обрису з урахуванням технічного стану екіпажної частини вагона та колії. Розрахункову схему вагона зі змінними кузовами, який рухається по колії, представлено механічною системою твердих тіл. Колія моделюється приведеною до кожного колеса масою, що має тільки вертикальне і поперечне горизонтальне переміщення та спирається в цих напрямках на пружини і демпфери в'язкого тертя, які моделюють пружно-дисипативні властивості рейок і підрейкової основи. Розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, які представляють динамічну модель коливань системи, що розглядається, здійснюється за допомогою метода Адамса–Башфорта. Проведено розрахункову оцінку динамічних процесів, що мають місце під час руху вагонів зі змінними кузовами різної довжини та маси. Визначено, що для всіх розглянутих варіантів руху вагона максимальні сили, що виникають в фітінгових упорах, через які кузова спираються на екіпажну частину, не перевищують допустимих значень. Аналіз розрахункових значень динамічних показників платформи показує, що з точки зору її безпеки для всіх розглянутих варіантів розміщення змінних кузовів на екіпажній частині вагона рух зі швидкістю вище 80 км/год не є безпечним. Практичну значимість мають розроблені пропозиції щодо перспективної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами. Впровадження інноваційної технології перевезень вантажів вагонами зі змінними кузовами дозволить уникнути їх простою при сезонних коливаннях відправки вантажів, а також пришвидшити заміну кузовів при пошкодженні. Крім того, у змінного кузова та екіпажної частини може бути різний термін служби, що дозволяє зменшити операційні витрати, знизити витрати на придбання і утримання рухомого складу.

Ключові слова: вантажний вагон зі змінними кузовами, елементи кріплення кузова до екіпажної частини, математичне моделювання, динаміка вагона, нормативні режими руху.

The importance of this work for Ukraine stems from the need for efficient freight transportation technologies, freight car fleet renewal, introducing swap-body freight cars, and increasing their operating safety. Swap-body cars are an innovation in freight services. Traditionally, versatile and specialized freight cars consist of an undercarriage part (running gear, automatic couplers, and automatic braking devices), which, as a rule, is versatile, and a body part (an underframe and a body). The cost of the former and the latter is 80 and 20 per cent, respectively, of the total car cost. The idea of a swap-body car is to separate the underframe from the car body and include the former into the undercarriage part, thus leaving only the car body in the body part. Thus, the undercarriage part of a car of this type is a flat car for swap bodies, which consists of an underframe, running gear, automatic couplers, automatic braking devices, and body fasteners. A new type of freight rail vehicles for unimodal railway transportation is the swap-body car, whose bodies can be replaced according to seasonal freights. For the Ukrainian railways, it is expedient to develop a swap-body car design of their own. This calls for scientific and technical support at the design and the operational development stage. The aim of this work is to determine the maximum loads on the load-bearing structural elements of swap-body cars in normal operation and to work out recommendations on a prospective home design of a swap-body freight car. This paper presents a mathematical model of 3D vibrations of a swap-body freight car in its normal motion along a track of arbitrary alignment, which accounts for the technical condition of the car undercarriage and the track. This model underlies the scien-

© О. М. Маркова, М. Б. Соболевська, О. М. Ковтун, В. В. Малий, Д. В. Горобець, 2023

Техн. механіка. – 2023. – № 1.

tific and technical novelty of the paper. The analytical model of a swap-body car moving along a track is a mechanical system of rigid bodies. For each wheel, the track is simulated as an equivalent mass, which can move only in a vertical and a lateral horizontal direction and bears in these directions on springs and viscous dampers, which model the elastoviscous properties of the rails and the underrail base. The nonlinear differential equations of the system's dynamics are solved by the Adams–Bashforth method. The paper presents a numerical estimate of the dynamics of motion of cars with swap bodies of different length and mass. For all the car motion variants considered, the maximum forces in the fitting supports whereby the body is supported on the undercarriage do not exceed their permissible values. The calculated values of the flat car's dynamic parameters show that in terms of safety a car speed higher than 80 km/h is not safe for all the body-on-undercarriage layouts considered. Practically important recommendations on a prospective home design of a swap-body freight car are presented. The innovative technology of freight transportation with the use of swap-body cars will allow one to avoid car demurrage caused by seasonal variations in freight shipment and speed up the replacement of damaged bodies. Besides, the service life of a body may differ from that of an undercarriage, which allows one to reduce acquisition, operation, and maintenance costs.

Keywords: *swap-body freight car, body-on-undercarriage fasteners, mathematical simulation, car dynamics, normal motion.*

Вступ. Актуальність даної роботи полягає в необхідності використання в Україні нових ефективних технологій вантажних перевезень, оновлення парку вантажного рухомого складу. Вантажні вагони зі змінними кузовами є інновацією у сфері транспортних послуг.

Традиційно універсальні та спеціалізовані залізничні вагони складаються з рами, ходових частин, автозчіпних і автогальмівних пристроїв та кузова. Умовно можна назвати ходові частини, автозчіпні та автогальмові пристрої вагонів екіпажною частиною, а раму з кузовом – кузовною частиною вагона. Екіпажна частина, як правило, є універсальною, а саме кузовна частина визначає спеціалізацію вагона під конкретний вид вантажу. При цьому вартість екіпажної та кузовної частин становить відповідно 80 % і 20 % від вартості всього вагона.

Ідея розробки вагонів із змінними кузовами полягає у відокремленні рами від кузова вагона та віднесення її до екіпажної частини, в той час як до кузовної частини вагона буде належати тільки кузов. Таким чином, екіпажною частиною такого вагона є платформа для перевезення змінних кузовів, що складається з рами, ходових частин, автозчіпного, автогальмівного обладнання та пристроїв кріплення змінних кузовів. У змінного кузова та екіпажної частини може бути різний термін служби, що дозволяє зменшити операційні витрати, знизити витрати на придбання і утримання рухомого складу. Новий вид вантажного рухомого складу для унімодальних залізничних перевезень – вагон зі змінними кузовами, які при сезонних змінах вантажів можуть замінюватись у порожньому стані. Надалі він може експлуатуватись як звичайний спеціалізований вагон.

Аналіз результатів патентно-бібліографічних досліджень [1 – 14] з питань перспективних технологій перевезення вантажів залізничним транспортом показав, що:

- в розвинутих європейських країнах для інтермодальних та мультимодальних вантажних перевезень активно використовуються контейнери стандарту ISO та знімні кузови;
- за останні роки у європейській практиці зросла популярність знімних кузовів, виконаних за принципом контейнера збільшеного об'єму;
- в Європі перевезення вантажів вагонами зі знімними кузовами стали рентабельнішими за контейнерні та контрейлерні технології. Знімні кузови використовуються у формуванні унімодального та інтермодального напрямків у міжнародних транспортних коридорах;

– інновацією у сфері світових транспортних послуг є вагони зі змінними кузовами. Головні їх відмінності від контейнера та знімного кузова полягають в тому, що і контейнер, і знімний кузов – це частина вантажу, який розміщується на універсальних фітингових платформах в основному габариті навантаження. Змінний кузов – це частина вагона, яка закріплюється на спеціальній платформі з особливими елементами кріплення. Його маса є частиною маси тари вагона, а габарит відповідає більш широкому і високому габариту рухомого складу. Змінний кузов має більший об’єм порівняно зі спеціалізованими контейнерами та знімними кузовами. Конструкція знімного кузова та його кріплень на вагоні розраховується на більші порівняно з контейнерами навантаження. У верхній частині змінний кузов обладнано кутовими фітингами для можливості зняття та постановки кузова із застосуванням типового для контейнерів підйомного обладнання;

– засновником технології вантажних перевезень у вагонах зі змінними кузовами є Швейцарська компанія “WASCOSA”, яка у 2009 році розробила гнучку вантажну систему (flex freight system) [9] вагонів зі змінними кузовами для залізниць колії 1435 мм. Ця система дозволяє гнучко регулювати короткострокові зміни в вантажах, що перевозяться, відокремлюючи кузов від екіпажної частини вагона, на виготовлення якої припадає найбільша частка витрат, в той час як виготовлення кузова обходиться значно дешевше. Якщо попит на транспортування певного вантажу падає, змінні кузова можна відкласти в сторону, що було б занадто дорого для цілого вантажного вагона, а екіпажну частину використовувати з іншим кузовом. Однак, на відміну від контейнера, кузов можна відокремити від вагона лише порожнім. Екіпажну частину такого вагона можна використовувати і для перевезень без кузова. Концепція WASCOSA flex freight system базується на двох елементах. Перший елемент – це фітингова платформа зі спеціальними додатковими елементами для кріплення змінних кузовів, яку можна також використовувати для перевезення контейнерів. Другим елементом є різні змінні кузова, які дозволяють переобладнати платформу в спеціальний вантажний вагон;

– в РФ ПАТ “НБК ОБК” на основі базової 6-вісної платформи зчленованого типу, яка може використовуватися для перевезення контейнерів або знімних кузовів, розроблено в габариті рухомого складу колії 1520 мм лінійку спецвагонів зі змінними кузовами для зерна, мінеральних добрив, вугілля та інших насипних вантажів, а також лісоматеріалів [1];

– в Україні ПП “Фірма “Глорія” ще у 2000 році розробила нову концепцію модульних вантажних одиниць та нову концепцію модульних вантажоперевізних комплексів для забезпечення можливості інтермодальних перевезень широкої номенклатури вантажів [14]. Згідно з концепцією модульних вантажних одиниць ПП “Фірма “Глорія” транспортний модуль – це фітингова або універсальна платформа. Контейнерний модуль – це універсальний контейнер особливого призначення типу перехідної платформи моделі 480.00.010, що відповідає вимогам стандартів ISO. Вантажний модуль – це контейнерне обладнання для розміщення та кріплення вантажів на контейнерному модулі. Вантажний модуль повинен забезпечувати зручне розміщення та надійне кріплення вантажів. Для штабелювання при складуванні або морських перевезеннях він може бути обладнаний стандартними верхніми кутовими фітингами. Модульна вантажна одиниця – це комплекс із двох виробів – контейнерного модуля та вантажного модуля, змонтованих з мож-

ливістю роз'єднання в експлуатації. Модульний вантажоперевізний комплекс – це комплекс із трьох виробів – транспортного модуля, контейнерного модуля та вантажного модуля, змонтованих з можливістю роз'єднання в експлуатації. Концепція модульних вантажоперевізних комплексів полягає в тому, що ці комплекси різної довжини, вантажопідйомності та спеціалізації можна формувати в експлуатації різними поєднаннями транспортних і вантажних модулів при незмінній моделі контейнерного модуля.

На теперішній час в Україні немає вітчизняних розробок вагонів зі змінними або змінними кузовами, але згідно з Національною економічною стратегією України на період до 2030 року [15] формування “безшовної мультимодальної мобільності” з урахуванням світових тенденцій є одним із завдань транспортної галузі нашої країни. Для вітчизняних залізниць доцільно розробити свою конструкцію вантажного вагона зі змінними кузовами. При цьому особливу увагу необхідно приділити розробці вузлів кріплення кузовів до платформи з метою забезпечення безпеки руху вагонів такого типу.

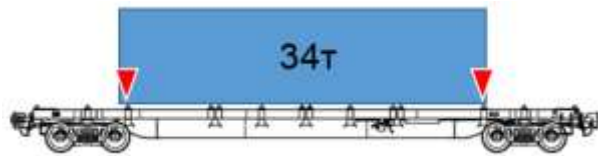
Впровадження інноваційної технології перевезень вантажів вагонами зі змінними кузовами дозволить забезпечити максимально ефективну експлуатацію вагонів зі змінними кузовами протягом всього життєвого циклу, уникнути їх простою при сезонних коливаннях відправки вантажів, в тому числі за рахунок швидкої заміни кузовів при пошкодженні. Замість кузова одного призначення легко поставити інший для зміни спеціалізації вагона і налаштування його під потреби перевезення. Створення сучасних вантажних вагонів зі змінними кузовами потребує науково-технічного супроводження на етапах їх проектування та експериментального відпрацювання.

Постановка задачі. Метою досліджень, викладених в статті, є визначення максимальних навантажень на несучі елементи конструкцій вагонів зі змінними кузовами при нормативних режимах руху та розробка пропозицій щодо перспективної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами.

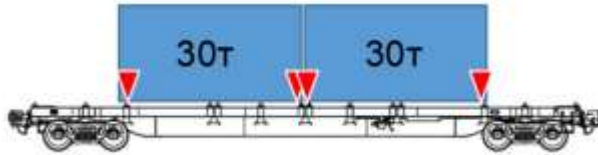
В статті розглянуто вантажні вагони, екіпажною частиною яких є фітингова платформа моделі 13-470 [16] на візках серійної конструкції, а змінні кузови мають габарити 20 футових та 40 футових контейнерів.

Дослідження проведено для п'яти типових варіантів розміщення змінних кузовів на екіпажній частині вагона (рис. 1):

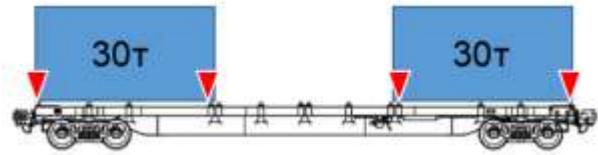
- варіант 1 – один кузов з габаритами 40 футового контейнера і масою 34 т (максимальне завантаження одним 40 футовим кузовом);
- варіант 2 – два кузови з габаритами 20 футового контейнера і масою 30 т кожен встановлено на середину екіпажної частини вагона (максимальне завантаження двома 20 футовими кузовами);
- варіант 3 – два кузови з габаритами 20 футового контейнера і масою 30 т кожен встановлено на краях екіпажної частини вагона;
- варіант 4 – три кузови з габаритами 20 футового контейнера і масою 24 т кожен (максимальне завантаження трьома 20 футовими кузовами);
- варіант 5 – три кузови з габаритами 20 футового контейнера і масою 5 т кожен (мінімальне завантаження трьома порожніми 20 футовими кузовами).



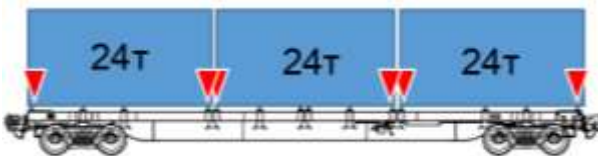
а)



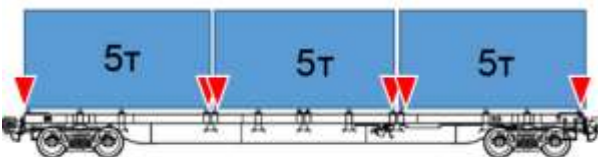
б)



в)



г)



д)

▼ – місця кріплень кузовів до скіпажної частини вагона

а) – варіант 1;

б) – варіант 2;

в) – варіант 3;

г) – варіант 4;

д) – варіант 5

Рис. 1 – Варіанти розміщення змінних кузовів на скіпажній частині вагона

Оцінку навантаженості фітингових упорів виконано при русі вантажного вагона зі змінними кузовами з різною швидкістю v (швидкість руху змінювалася в діапазоні від 40 км/год до 120 км/год) по прямолінійних ділянках колії, кругових кривих з радіусами 300 м і 650 м, а також вхідних і вихідних кривих. Згідно зі стандартом [17] допустимі поздовжні сили, що діють на фітингові упори, дорівнюють 300 кН, вертикальні – 150 кН, поперечні – 150 кН.

Математичне моделювання. Дослідження просторових коливань рухомого складу з урахуванням динамічних характеристик вантажів, що перевозяться, пов'язане з розглядом складних механічних систем з великою кількістю степенів вільності [18]. До таких випадків відноситься вивчення динамічних процесів, що мають місце під час руху вагонів зі змінними кузовами різної довжини та маси. При цьому слід розглядати розгалужені механічні системи. Математичний опис руху таких систем по колії довільного обрису навіть за суттєвої ідеалізації розрахункових схем призводить до досить складних моделей.

У досліджуваному варіанті обидві підсистеми (платформа та кузови) розглядаються як системи твердих тіл, з'єднаних жорсткими, шарнірними, пружними та дисипативними елементами.

Розрахункова схема вагона зі змінними кузовами, який рухається по колії, представлена механічною системою $(11+n)$ твердих тіл – платформа, дві надресорні балки, чотири бічні рами, чотири колісні пари та n кузовів. Колія розглядається інерційною пружно-в'язкою. Вона моделюється приведеною до кожного колеса масою (вісім приведених мас), що має тільки вертикальне і поперечне горизонтальне переміщення та спирається в цих напрямках на пружини і демпфери в'язкого тертя, що моделюють пружно-дисипативні властивості рейок і підрейкової основи [19].

Число степенів вільності для розрахункової схеми даного залізничного екіпажа дорівнює $6 \times 11 + 2 \times 8 - 52 + 6 \times n$. При цьому виключено 52 степені вільності в результаті урахування обмежень, накладених на переміщення тіл механічної системи, що розглядається, в силу загальноприйнятих припущень та конструктивних особливостей ходових частин платформи [18 – 19].

Диференціальні рівняння руху вагона зі змінними кузовами по колії довільного обрису отримано у формі рівнянь Лагранжа другого роду [19]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} = Q_i, \quad (i = 1, \dots, 30 + 6n). \quad (1)$$

Кінетична енергія механічної системи T отримана додаванням кінетичних енергій тіл, що входять до системи. Для кожного з тіл кінетична енергія визначалася за теоремою Кеніга. Потенціальна енергія системи Π визначалася як сума енергій пружних деформацій та змін енергії внаслідок підйому або опускання центрів мас тіл, що входять до системи. Потенціальна енергія деформацій пружних елементів визначалася за теоремою Клапейрона з урахуванням взаємних переміщень тіл, що деформують пружний зв'язок. У цьому випадку враховувалася деформація зв'язків у елементах платформи, а також у елементах з'єднання платформи з кузовами. При визначенні функції розсіювання Φ бралася до уваги дія сил в'язкого тертя при вертикальних і горизонтальних прогинах колії. Крім того, враховувалася дія сил сухого тертя у центральному підвішуванні екіпажа та при взаємних поворотах рами

платформи відносно надресорних балок у плані. Узагальнені сили Q , які мають потенціал, є силами взаємодії коліс і рейок і визначаються відповідно до нелінійної теорії Калкера. Після підстановки в (1) отриманих виразів кінетичної та потенціальної енергій, функцій розсіювання та узагальнених сил отримано систему нелінійних диференціальних рівнянь, що описує вимушені коливання залізничної колії та вантажного вагона зі змінними кузовами.

Розрахункову оцінку динамічних показників вагона зі змінними кузовами проведено шляхом аналізу результатів розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь, які представляють динамічну модель коливань системи, що розглядається. Чисельні рішення нелінійних диференціальних рівнянь отримано за допомогою метода Адамса–Башфорта.

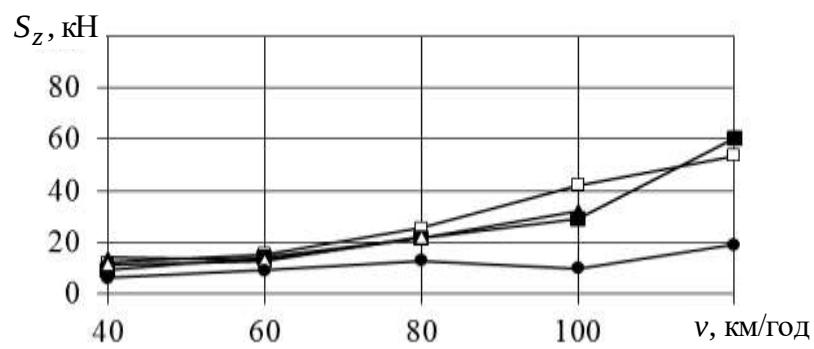
Розроблена математична модель дозволяє імітувати широкий спектр різних випадків, що охоплюють всілякі поєднання параметрів технічного стану ходових частин, платформи загалом та колії. В результаті розрахунків може бути отримано будь-який набір необхідних вихідних величин.

Рух платформи моделюється з урахуванням дії зовнішніх збурень, пов'язаних з геометричною недосконалістю рейкової колії (просідання, стики, нерівномірний знос). В якості збурень прийнято випадкові функції, які представлено у вигляді випадкових стаціонарних процесів з гаусівським розподілом по амплітуді та спектральною щільністю, що має монотонно падаючий характер. Збурення подаються під колеса екіпажа з транспортним запізненням, яке залежить від відстані між колісними парами та швидкості руху екіпажа.

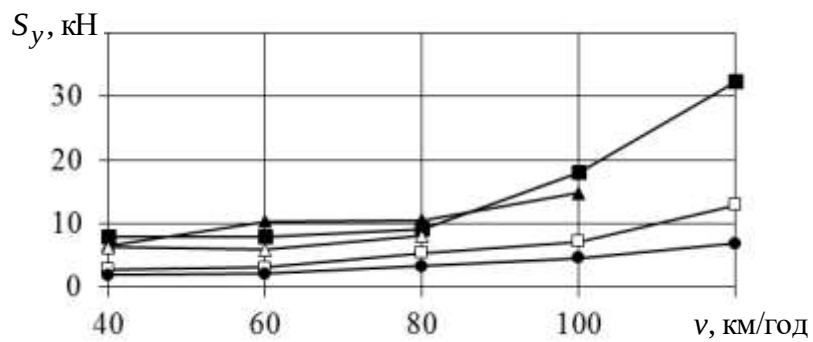
Результати досліджень. Проведені розрахунки показали, що в жодному з розглянутих варіантів руху вагона максимальні сили, що діють на фітингові упори, через які кузова спираються на екіпажну частину, не перевищують допустимих значень (допустимі поздовжні сили – 300 кН, вертикальні – 150 кН, поперечні – 150 кН) [17]. Нижче на рис. 2 – 4 наведено залежності розрахункових значень вертикальних S_z , горизонтальних поперечних S_y і поздовжніх S_x сил, що діють на фітингові упори, від швидкості руху платформи прямолінійною ділянкою колії (рис. 2), а також по кругових кривих радіусами 650 м (рис. 3) і 300 м (рис. 4). Як видно з наведених графіків, максимальне навантаження фітингових упорів спостерігається у вертикальному напрямку, найменше – у поздовжньому напрямку. При цьому найбільше вертикальне навантаження фітингів спостерігається для варіанта 1. Під час руху прямолінійною ділянкою колії збільшення швидкості руху призводить до зростання навантаженості фітингів у всіх напрямках.

Також проведено розрахунки щодо оцінки навантаженості фітингових упорів під час екстреного гальмування платформи зі змінними кузовами. Проведені розрахунки показали, що в цьому випадку горизонтальні поздовжні навантаження на фітингові упори у всіх розглянутих розрахункових варіантах різко збільшуються. Але в жодному з розглянутих випадків рівень поздовжніх сил не перевищив допустиму величину.

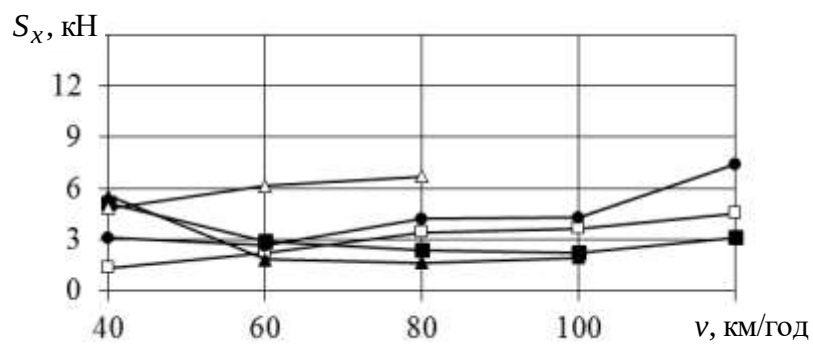
Під час моделювання руху залізничних екіпажів основна увага приділяється питанням оцінки безпеки їх руху. Для перевірки умов безпеки руху платформи паралельно оцінці навантаженості несучих елементів проводилася оцінка динамічних якостей платформи, які є основними показниками ходу залізничних екіпажів відповідно до вимог стандарту [20]. До таких величин



а)



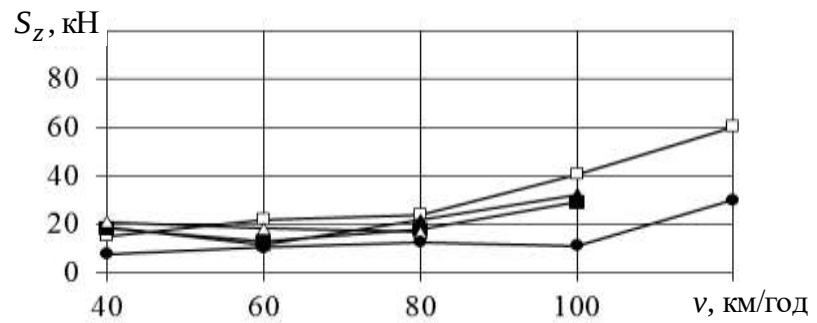
б)



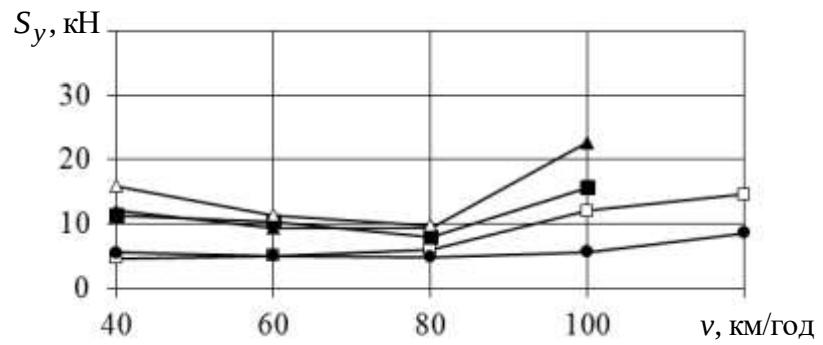
в)

- — варіант 1;
- — варіант 2;
- ▲ — варіант 3;
- △ — варіант 4;
- — варіант 5

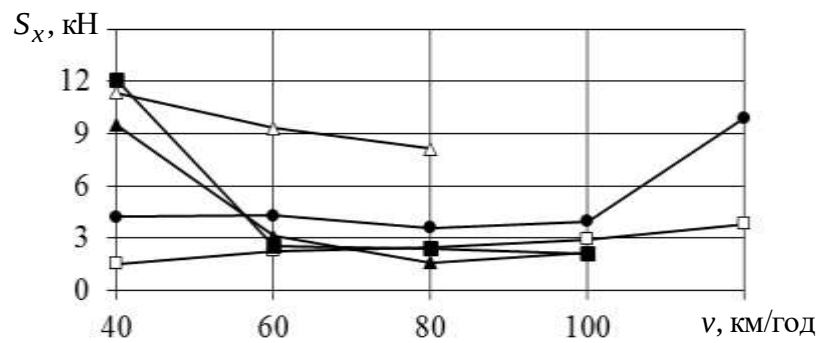
Рис. 2 – Залежності максимальних значень вертикальних S_z (а), поперечних S_y (б) і поздовжніх S_x (в) сил, що діють на фітингові упори від швидкості руху по прямій ділянці колії



а)



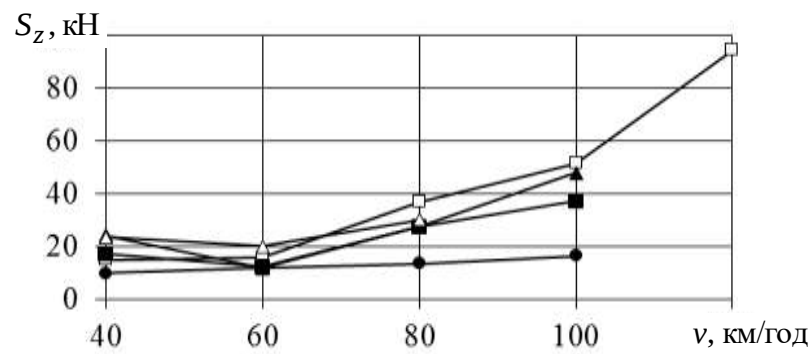
б)



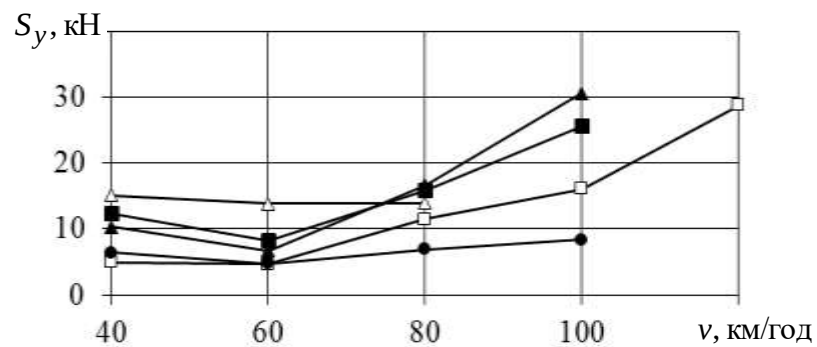
в)

- — варіант 1;
- — варіант 2;
- ▲ — варіант 3;
- △ — варіант 4;
- — варіант 5

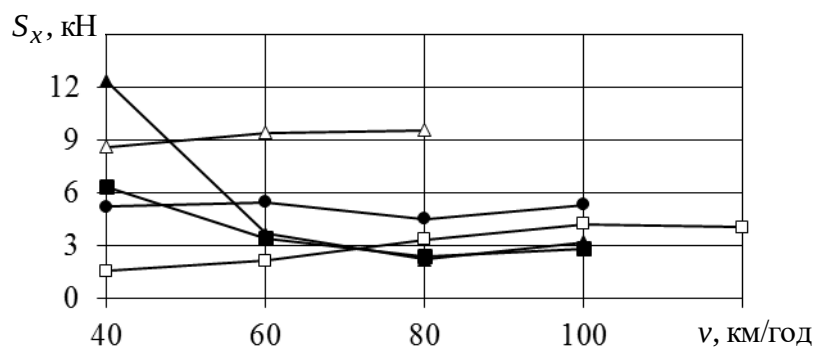
Рис. 3 – Залежності максимальних значень вертикальних S_z (а), поперечних S_y (б) і поздовжніх S_x (в) сил, що діють на фітінгові упори від швидкості руху по круговій кривій $R = 650$ м



а)



б)



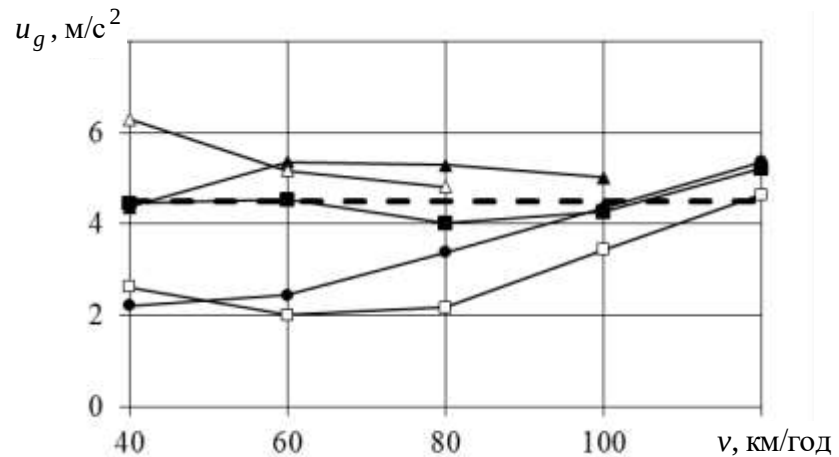
в)

- — варіант 1;
- — варіант 2;
- ▲ — варіант 3;
- △ — варіант 4;
- — варіант 5

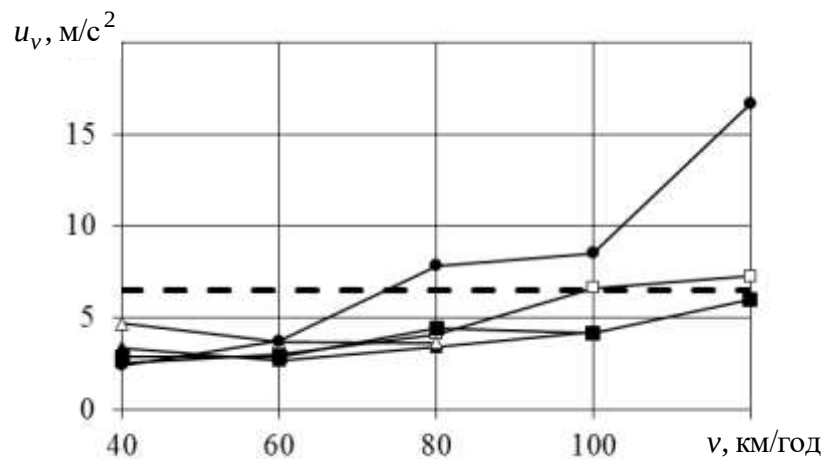
Рис. 4 – Залежності максимальних значень вертикальних S_z (а), поперечних S_y (б) і поздовжніх S_x (в) сил, що діють на фітінгові упори від швидкості руху по круговій кривій $R = 300$ м

відносяться горизонтальні (u_g) та вертикальні (u_v) прискорення екіпажної частини вагона в місцях спирання її на візки, рамна сила в долях навантаження на вісь (k_g), коефіцієнт вертикальної динаміки (k_v), а також коефіцієнт запасу стійкості колеса проти сходу з рейок (k_{st}).

На рис. 5 – 7 наведено розрахункові динамічні показники для вагонів зі змінними кузовами згідно з варіантами 1 – 5 розміщення змінних кузовів на екіпажній частині вагона.



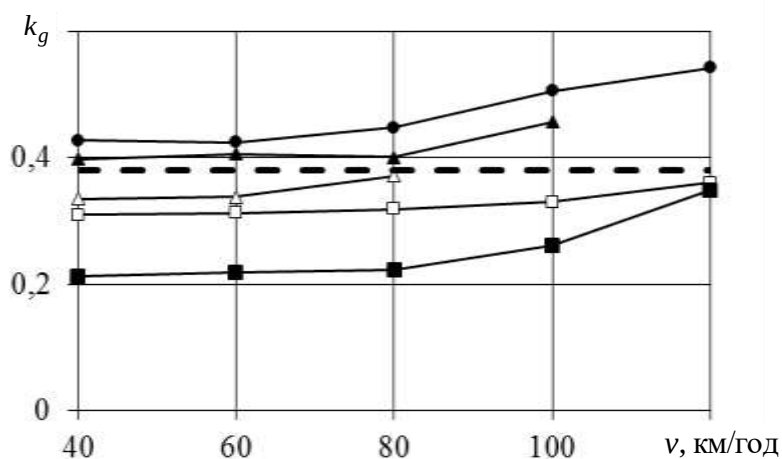
а)



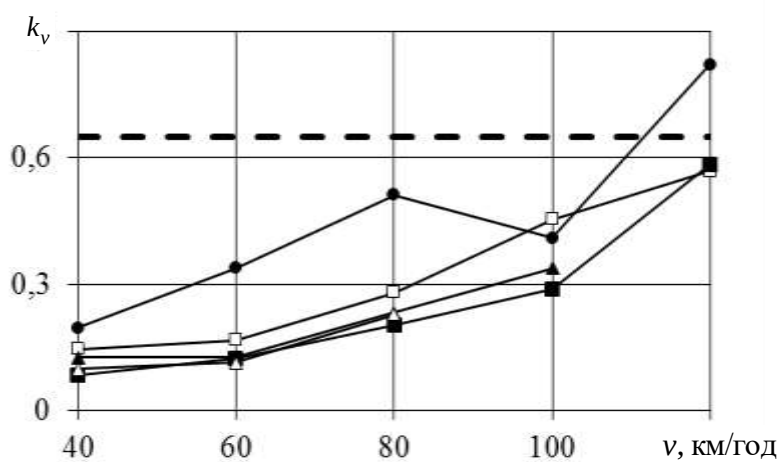
б)

- варіант 1;
- ◊— варіант 2;
- ▲— варіант 3;
- ⊕— варіант 4;
- варіант 5;
- — допустиме значення

Рис. 5 – Залежності максимальних значень поперечних u_g (а) та вертикальних u_v (б) прискорень п'ятників платформи від швидкості руху по прямій ділянці колії



а)



б)

- варіант 1;
- варіант 2;
- ▲— варіант 3;
- △— варіант 4;
- варіант 5;
- - - допустиме значення

Рис. 6 – Залежності максимальних значень рамних сил у долях статичного осьового навантаження k_g (а) та коефіцієнтів вертикальної динаміки k_v (б) платформи від швидкості руху по прямій ділянці колії

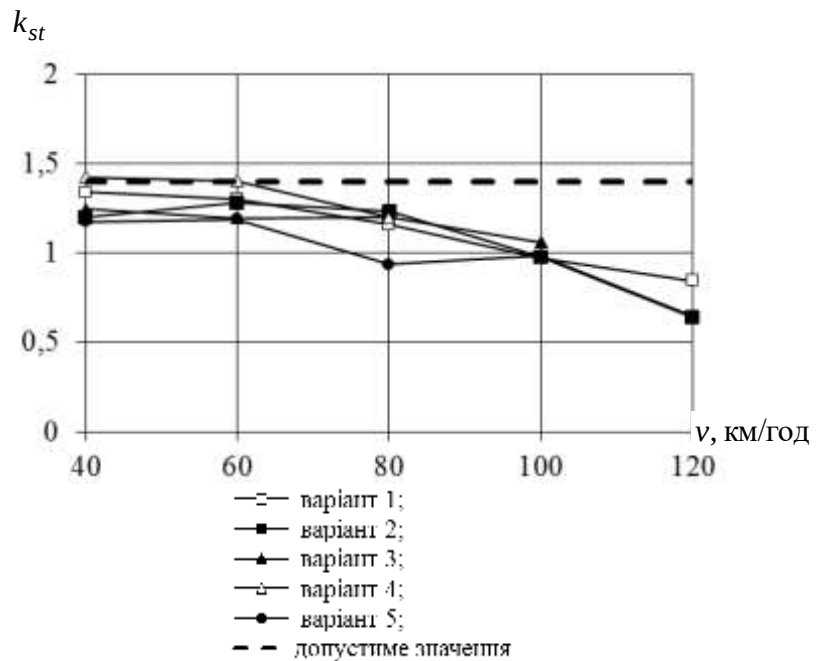


Рис. 7 – Залежності мінімальних значень коефіцієнтів запасу стійкості колеса проти сходу з рейок k_{st} платформи від швидкості руху по прямій ділянці колії

З розгляду наведених графіків видно, що найбільш несприятливими за умовами безпеки руху є варіанти 3 і 4. У цих випадках істотно перевищується рівень допустимого значення горизонтальних прискорень екіпажної частини вагона в районі п'ятникових опор, що може призвести до сходу коліс з рейок при швидкості руху 80 км/год для варіанта 4 і 100 км/год для варіанта 3. Для варіанта 5 також характерне перевищення допустимих значень динамічних показників. Для коефіцієнта запасу стійкості колісної пари від сходу з рейок характерне суттєве зниження зі збільшенням швидкості руху. У цілому аналіз розрахункових значень динамічних показників екіпажної частини вагона показує, що з погляду безпеки її руху для всіх розглянутих варіантів рух зі швидкістю вище 80 км/год не є безпечним.

Таким чином, розроблено математичну модель просторових коливань вантажного вагона зі змінними кузовами при його русі по колії довільного обрису. Проведено розрахункову оцінку динамічних процесів, що мають місце під час руху вагонів зі змінними кузовами різної довжини та маси. Встановлено, що в жодному з розглянутих варіантів руху вагонів зі змінними кузовами максимальні сили, що виникають в фітінгових упорах, через які кузова спираються на екіпажну частину вагона, не перевищують допустимих значень. Аналіз розрахункових значень динамічних показників платформи показує, що з погляду безпеки її руху для всіх розглянутих варіантів розміщення змінних кузовів на екіпажній частині вагона рух зі швидкістю вище 80 км/год не є безпечним.

Пропозиції щодо перспективної вітчизняної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами. Розроблено пропозиції щодо перспективної вітчизняної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами та елементів кріплення різних кузовів до платформи:

- габарити змінного кузова доцільно обирати максимально наближеними до допустимих габаритів рухомого складу залізниць колії 1520 мм;

- у верхній частині змінного кузова потрібно передбачити наявність кутових фітингів для можливості зняття та постановки кузова із застосуванням типового для контейнерів підйомного обладнання, а також можливості виконання операцій штабелювання;
- в якості екіпажної частини вагона зі змінними кузовами, яка складається з рами, ходових частин, автозчіпного, автогальмівного обладнання та пристроїв кріплення змінних кузовів, доцільно використовувати універсальну або спеціалізовану фітингову платформу, в тому числі зчленованого типу. За потреби така платформа може експлуатуватися і без змінних кузовів, наприклад для контейнерних перевезень;
- при розробці змінного кузова доцільно використовувати легкі корозостійкі полімерні композитні матеріали, що забезпечують меншу величину тари при кращих показниках міцності;
- фітингову платформу доцільно робити з високоміцної сталі полегшеної конструкції, використовуючи досвід австрійської компанії “Voestalpine” при виконанні проекту TransANT [11 – 12];
- пристрої кріплення змінного кузова до платформи доцільно розміщувати таким чином, щоб забезпечити максимально рівномірний розподіл навантаження на платформу при експлуатаційних режимах руху вагона;
- пристрої кріплення змінних кузовів до платформи доцільно розробляти таким чином, щоб передбачити можливість їх швидкого монтажу та демонтажу до платформи, враховуючи досвід української ПП “Фірма “Глорія” у розробці контейнерного модулю у вигляді універсального контейнера особливого призначення типу платформи;
- конструкцію пристрою кріплення змінного кузова до платформи доцільно проектувати з урахуванням необхідності швидкої автоматичної заміни кузова при пошкодженні;
- за умови відсутності спеціальної нормативної бази змінні кузова доцільно розробляти, випробовувати та сертифікувати за залізничними нормативами спільно з базовою платформою як єдиний вантажний вагон;
- окрему увагу необхідно приділити міцності елементів з’єднання змінного кузова з екіпажною частиною вагона при діючих нормативних навантаженнях, визначених стандартом ДСТУ 7598:2014 [21] для I і III режимів руху вантажного вагона.

Висновки. Розроблено математичну модель просторових коливань вантажного вагона зі змінними кузовами при нормативних режимах руху по колії довільного обрису з урахуванням технічного стану екіпажної частини вагона та колії. Проведено розрахункову оцінку динамічних процесів, що мають місце під час руху вагонів зі змінними кузовами різної довжини та маси. Розглянуто вантажні вагони, екіпажною частиною яких є фітингова платформа моделі 13-470 на візках серійної конструкції, а змінні кузова мають габарити 20 футових та 40 футових контейнерів. Дослідження проведено для п’яти типових варіантів розміщення змінних кузовів на екіпажній частині вагона. Дано оцінку навантаженості фітингових упорів при русі вантажного вагона з різною швидкістю (швидкість руху змінювалася в діапазоні від 40 км/год до 120 км/год) по прямолінійних ділянках колії, кругових кривих з радіусами 300 м і 650 м, а також вхідних і вихідних кривих. Встановлено, що в жодному з розглянутих варіантів руху вагонів зі змінними кузовами максимальні сили, що виникають в фітингових упорах, через які кузова спираються на екіпажну частину вагона, не перевищують допустимих значень. Аналіз розрахункових значень динамічних показників платформи показує, що з по-

гляду безпеки її руху для всіх розглянутих варіантів розміщення змінних кузовів на екіпажній частині вагона рух зі швидкістю вище 80 км/год не є безпечним. Розроблено пропозиції щодо перспективної вітчизняної конструкції вантажного вагона зі змінними кузовами.

1. Орлова А. В чем отличия и преимущества сменных и съемных кузовов грузовых вагонов. URL: <https://wagon-cargo.ru/news/v-chem-otlichiya-i-preimushchestva-smennykh-i-semnykh-kuzovov-gruzovykh-vagonov/> (дата звернення: 30.11.2021).
2. Давидан А. Сменный кузов вагона – перспективная инновация в сфере транспортных услуг. URL: <https://spec.rzd-partner.ru/page16921814.html> (дата звернення: 30.11.2021).
3. Давидан А. Е. Бороненко Ю. П. Сменный кузов вагона – перспективная инновация в сфере транспортных услуг. URL: <http://%D0%BC%D0%BE%D1%8F%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%8F1520.%D1%80%D1%84/new/7411/> (дата звернення: 30.11.2021).
4. Вагоны со сменными кузовами. URL: https://www.uniwagon.com/multimedia/media_about_us/vagony-so-smennymi-kuzovami/ (дата звернення: 30.11.2021).
5. SECU-Box for Better utilization of Load Capacity. Advantage Environment – 2009. URL: <http://advantage-environment.com> (дата звернення: 30.11.2021).
6. InnoFreight. InnoWaggon – No base, no go. URL: <https://www.innofreight.com/en/logistics-solutions/inno-waggon/> (дата звернення: 14.03.2023).
7. New body module for the WASCOSA flex freight system® in successful practical use. URL: https://www.wascosa.ch/en/media/press-releases/new-body-module-for-the-wascosa-flex-freight-system-in-successful-practical-use_m424 (дата звернення: 14.03.2023).
8. Innovations WASCOSA flex freight system® with timber cassette swap body. URL: https://www.wascosa.ch/wagenpark/pdf/en/innovationen/inno_wascosa_flex_freight_system_timber_swap_body.pdf (дата звернення: 14.03.2023).
9. Innovations WASCOSA flex freight system® with E-type swap body. URL: https://www.wascosa.ch/wagenpark/pdf/en/innovationen/inno_wascosa_flex_freight_system_e_type_swap_body.pdf (дата звернення: 14.03.2023).
10. Wascosa introduces the Wascosa flex freight system for transporting chemical products. URL: <https://tanknewsinternational.com/wascosa-introduces-the-wascosa-flex-freight-system-for-transporting-chemical-products/> (дата звернення: 14.03.2023).
11. TransANT: инновационные грузовые вагоны. URL: <https://www.railway.supply/transant-innovacionnye-gruzovye-vagony/> (дата звернення: 14.03.2023).
12. В Австрии изготовлена первая партия инновационных модульных грузовых вагонов. URL: https://logist.today/dnevnik_logista/2019-11-23/v-avstrii-izgotovlena-pervaja-partija-innovacionnyh-modulnyh-gruzovyh-vagonov/ (дата звернення: 14.03.2023).
13. Шестиосный вагон-платформа сочлененного типа со сменными кузовами, модель 13-9994*. URL: <http://%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F%D0%BE%D0%B2%D0%BA.online/view/wagons/13-9994/> (дата звернення: 30.11.2021).
14. Петрухин В. Модульные решения для железнодорожных перевозок. URL: <https://logist.fm/publications/modulnye-resheniya-dlya-zheleznodorozhnyh-perevozok> (дата звернення: 14.03.2023).
15. Національна економічна стратегія 2030. URL: <https://nes2030.org.ua/#rec246067109> (дата звернення: 14.03.2023).
16. 4-осная платформа для крупнотоннажных контейнеров, модель 13-470. URL: <https://ukrailtrans.com.ua/4-osnaya-platforma-dlya-krupnotonnazhnykh-kontejnerov-model-13-470/> (дата звернення: 14.03.2023).
17. ДСТУ ISO 1496-1:2013 Вантажні контейнери серії 1. Технічні вимоги та методи випробування. Частина 1. Контейнери загальної призначеності універсальні. Чинний від 2014–07–01. Київ: ТК 98 “Засоби і системи автоматизації технологічних процесів, пакування та контейнеризації”, 2014. 12 с. URL: http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=91532 (дата звернення: 14.03.2023).
18. Лазарян В. А. Динамика вагонов. М.: Транспорт, 1964. 256 с.
19. Markova O., Kovtun H., Maliy V. Modelling train motion along arbitrary shaped track in transient regimes. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit. 2015. № 229 (1). P. 97–105. <https://doi.org/10.1177/0954409713501806>
20. ДСТУ EN 14363:2019 Залізничний транспорт. Випробування та моделювання для прийняття ходових характеристик залізничних транспортних засобів. Бігова поведінка та стаціонарні випробування. Чинний від 2020-01-01. Київ: ДП “УкрНДНЦ”, 2020. 198 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=85289 (дата звернення: 14.03.2023).
21. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Чинний від 2015-07-01. Київ: Державний Український науково-дослідний інститут вагонобудування (УкрНДІВ), 2014. 162 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73763 (дата звернення: 14.03.2023).

Отримано 16.03.2023,
в остаточному варіанті 30.03.2023